

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra informatiky**

**Zvukový syntezaťor**

**Sound Synthesier**

**2013**

**David Galář**

## Zadání bakalářské práce

Student: **David Galář**  
Studijní program: B2647 Informační a komunikační technologie  
Studijní obor: 2612R025 Informatika a výpočetní technika  
Téma: **Zvukový syntezátor**  
**Sound Synthesier**

### Zásady pro vypracování:

Zvuk jako takový je nedílnou součástí multimediálního světa počítačů. Muzikanti na celém světě využívají ke komponování muziky počítačů a zvukových syntezátorů. Zadáním této bakalářské práce je zpracování informací o softwareových zvukových syntezátorech a implementace jednoduchého syntezátoru. Syntezátor bude realizován jako multiplatformní programová knihovna, nebo přímo realizován na bázi procesoru AVR s DAC. Student musí splnit následující body:

1. Nastudovat materiály o zvukových syntezátorech z hlediska signálové analýzy.
2. Zpracovat State of The Art.
3. Navrhnout vlastní implementaci zvukového syntezátoru.
4. Implementovat knihovnu (realizovat elektronický modul) zvukového syntezátoru.
5. Řádně otestovat a kriticky zhodnotit vlastní řešení práce.

### Seznam doporučené odborné literatury:

Podle pokynů vedoucího bakalářské práce.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Karel Mozdřen**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013



doc. Dr. Ing. Eduard Sojka  
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 7.5.2013

  
.....  
podpis studenta

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval Ing. *Karlovi Mozdřeňovi* za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Zvuk jako takový je nedílnou součástí multimediálního světa počítačů. Muzikanti na celém světě využívají ke komponování muziky počítačů a zvukových syntezátorů. Cílem této bakalářské práce je zpracování informací o softwarových zvukových syntetizátorech a implementace jednoduchého syntetizátoru. Syntezátor je realizován jako multiplatformní programová knihovna. Teoretická část obsahuje seznámení se syntetizátory jejich vývoj a metody syntézy, které mohou být použity při tvorbě virtuálního syntetizátoru. Část praktická pak vlastní návrh a realizaci softwarového syntetizátoru. Posledním bodem práce je zhodnocení výsledného syntetizátoru.

## **Klíčová slova**

Zvukový syntetizátor, syntetizér, aditivní syntéza, generátor obálky typu ADSR, softwarový syntetizátor, zvukový signál

## **Abstract**

The sound itself is an integral part of the multimedia world of computers. Musicians around the world use computers to compose music and sound synthesizers. Specifying this thesis is the processing of audio software synthesizer and implementation of a simple synthesizer. The synthesizer is implemented as a cross-platform software library. Theoretical part introduces synthesizers their development and synthesis methods that can be used when creating virtual synthesizer. The practical part includes the design and implementation of the software synthesizer. The last topic of the thesis is to evaluate the resulting synthesizer.

## **Key words**

Sound synthesier, additive synthesis, ADSR envelope generator, virtual synthesier, sound signal

## Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
<b>f</b>	Hz	frekvence
<b>t</b>	S	čas
<b>E</b>		Amplituda

## Seznam použitých zkratek

Zkratka	Anglický význam	Český význam
<b>ADSR</b>	Attack-Decay-Sustain-Release	generátor obálky se čtyřmi parametry
<b>AM</b>	Amplitude Modulation	amplitudová modulace
<b>EG</b>	Envelope Generator	generátor obálky
<b>FM</b>	Frequency Modulation	frekvenční modulace nebo také název pro typ zvukové syntézy
<b>LSI</b>	Large scale Integration	integrované obvody s vysokou integrací
<b>MIDI</b>	Musical Instruments Digital Interface	Digitální komunikační rozhraní hudebních nástrojů
<b>VA</b>	Virtual Acoustic	Virtuální akustická syntéza firmy Yamaha
<b>VCF</b>	Voltage Controlled Filter	napětově řízený filtr



# Obsah

1	Úvod .....	1
2	Pojem zvukové syntézy .....	3
	2.1 Metody pro syntetizaci zvuku .....	3
3	Metody zvukové syntézy .....	7
	3.1 Součtová (aditivní) syntéza .....	7
	3.2 Rozdílová(subtraktivní) syntéza .....	8
	3.3 Modulační metody syntézy.....	8
	3.4 Tvarová syntéza.....	9
	3.5 Modelující metody zvukové syntézy .....	10
4	Softwarový syntetizátor .....	12
	4.1 Nejpoužívanější softwarové syntetizátory .....	12
	4.2 Návrh vlastního syntetizátoru .....	14
	4.3 Řešení syntetizátoru .....	15
5	Popis testu a experimentu.....	24
6	Závěr.....	25
	Použitá literatura .....	26
	Seznam příloh.....	28

# 1 Úvod

Zvuky, které můžeme slyšet jsou podélné mechanické vlnění hmotného prostředí s kmitočtem v rozmezí přibližně od 16 Hz do 20 kHz, které působí-li na lidský sluchový orgán vyvolává v něm subjektivní sluchový vjem. Zvukové vlny se od zdroje zvuku šíří všemi směry. Rychlost šíření zvuku je závislá na vlastnostech prostředí; v případě vzduchu je to zejména teplota a atmosférický tlak.

Zvuková syntéza označuje proces vytváření zvuků pomocí elektronických prostředků. Když jsou poté tyto elektrické signály poslány do reproduktoru, jsou přeměněny na mechanické vibrace, které produkují zvuk. Pojem syntetické znamená, že je to uměle vytvořené jako náhrada za přírodní látku nebo proces. Podobně můžeme považovat syntezátory za náhradu tradičních hudebních nástrojů nebo jiných fyzických zařízení, které produkují zvuk. Ale také o nich můžeme přemýšlet jako o plnohodnotných hudebních nástrojích, které vytvářejí zvuky, které bychom jinak slyšet nemohli. Syntetizátory dokáží produkovat zvuky, které není možné pomocí běžných hudebních nástrojů vytvořit, protože nepodléhají na rozdíl od tradičních hudebních nástrojů omezení z hlediska materiálu nástroje ani jeho rozsahu. Softwarové prostředky využívané pro imitaci přírodních zvuků jsou stejné jako ty, které se používají k vytváření zvuků nových. Uživatel si tedy může vybrat jestli chce syntetizátor používat jako náhradu za hudební nástroj nebo ho využít k vytváření zvuků nových jinak nedostupných.

Syntetická hudba se začala objevovat v polovině 20. Století [3], kdy se skladatelé a hudebníci snažili hledat nové výrazové prostředky. Samozřejmě k tomu přispělo prohlubování znalostí o elektřině a magnetismu a s ním spojeny rozvoj elektrotechniky a elektroniky. Elektřina se nejprve využívala pouze jako zdroj energie pro hudební nástroje, poté jako prostředek pro jejich řízení a ovládání a nakonec i pro samotné generování zvuku. Hudební nástroje a elektřina k sobě ovšem přirozeně patří, protože elektromagnetické síly jsou příčinou mnoha fyzikálních jevů, a tak je elektřina skrytě přítomna i v tradičních hudebních nástrojích. Elektrotechnika, elektromechanika a elektronika, které cíleně využívají vlastnosti elektromagnetismu, dále ovlivnily i konstrukci hudebních nástrojů, kde se poté přítomnost elektřiny ještě zviditelňovala. Časem se proto objevila nová skupina hudebních nástrojů, buď elektromechanických nebo čistě elektronických, které začaly být označovány jako elektrofony [6]. Postupně se staly běžnou součástí orchestrů a jiných hudebních uskupení a v některých hudebních stylech, například u taneční hudby, je dokonce všechen zvuk vytvářen pouze elektronickou cestou bez použití klasických nástrojů.

V dnešní době existuje mnoho hudebních syntezátorů, ať už analogových, digitálních nebo virtuálních. Nutno ovšem dodat, že analogové syntezátory jsou vytlačovány digitálními, a to nejen díky své ceně, ale i kvůli tomu, že digitální syntezátor může velmi věrně simulovat činnost

analogového. Ale i přesto se můžeme setkat s nadšenci, kteří dávají přednost interakci se skutečným fyzickým nástrojem. Syntezátory se dnes používají ve většině hudebních žánrů od jazzu a blues, přes rock, pop a country až po vážnou hudbu. Jsou tak rozšířené hlavně proto, že to může být celkem levná alternativa za nástroj klasicky a jednou z možností jak si syntezátor opatřit je naprogramovat si jej. Tato možnost se objevila v 90. letech, kdy se výpočetní výkon mikroprocesorů zvětšil natolik, že bylo možné pro zpracování a generování zvuků v reálném čase využívat osobní počítače. Ty tak začaly nahrazovat mnohé elektronické nástroje a efektové procesory. Na přelomu tisíciletí dosáhly potřebného výkonu i počítače přenosné a mohly se tak začít používat na zpracování, upravování a generování zvuku i na živých vystoupeních a laptop se tak vlastně stal dalším hudebním nástrojem. V některých hudebních směrech se stal běžnou součástí nástrojového obsazení a skoro ve všech se používá pro manipulaci se zvukem a jeho úpravu.

Možnost využití syntetizátoru při tvorbě a upravování hudby a její použití při vytváření filmů a počítačových her jejichž je hudba nedílnou součástí byl také jeden z hlavních důvodů proč jsem si zvolil toto téma bakalářské práce. Moje řešení syntetizátoru jako modulu multiplatformní knihovny se právě může využít jako základ pro vytváření zvuku do počítačových her, filmů nebo hudebních klipů.

## 2 Pojem zvukové syntézy

Zvuková syntéza je především pojem pro umělé generování zvuku se záměrem využití v elektronické hudbě. S přihlédnutím na to, že primárním zdrojem signálu se může stát prakticky jakýkoli zvukový signál, tedy buď přirozený, nebo uměle generovaný. Definovat ji můžeme jako proces generování a zpracování zvukového signálu technologickými prostředky v různých formách a žánrech elektroakustické hudby.

Předtím než začnu popisovat obecnou teorii zvukového signálu se zaměřím na uměle generované signály a jejich užití. V historii zvukových syntéz se můžeme setkat s celou řadou pohledů na jejich principy a užití. Obecněji lze roli uměle generovaného signálu rozdělit na imitativní nebo inovativní.

### 2.1 Syntetizace zvuku

**Imitativní role** [1] syntezátorů vychází z poznání jevů z oblasti akustiky hudebních nástrojů. Znalosti vycházejí z fyzikálních příčin vzniku tónu přirozenou cestou nebo z navození co největšího dojmu a iluze znění akustického nástroje, rozdělují imitativní princip syntézy na další dvě podskupiny: objektivní neboli funkčně-imitativní a subjektivní neboli zvukově-imitativní.

Objektivní přístup k algoritmu syntézy sleduje přímou souvislost uměle generovaného signálu s jeho akustickou předlohou už při vzniku tónu. Pravděpodobně nejdokonalejším způsobem, který vychází z tohoto přístupu, je matematické modelování fyzikálních struktur, které se také říká virtuální zvuková syntéza. Na základě matematických rovnic popisujících děje kmitání a vlnění v akustických soustavách, je vytvořen model, který se snažíme realizovat v reálném čase nebo mimo něj jako jeho kopii, s pomocí výpočetní techniky. Díky tomu, že většina akustických jevů u přirozených akustických nástrojů je již dobře popsána a stav vývoje digitální techniky vyhovuje nasazení výpočtů složitých rovnic v reálném čase, lze většinu nástrojů touhle cestou věrně napodobit.

Naproti tomu subjektivní přístup k metodám umělého generování signálu vychází z faktu, že vjem barvy hudebního signálu a dalších jeho charakteristik lze navodit pomocí zástupných procesů, které nevycházejí z principu tvorby tónu na simulované předloze a jsou nezávislé na použité metodě jejich generování. První fáze napodobení zvuku akustického nástroje touto cestou je analýza zvukového projevu a nalezení vhodných simulačních algoritmů syntézy pro vyjádření co největšího počtu charakteristických parametrů zvuku. Typickými zástupci jsou analýza kmitočtového spektra pomocí Fourierovy transformace [8], sledování průběhu amplitudové obálky a další. Zkoumání simulovaných signálů probíhá buď v objektivní rovině přímým měřením jeho charakteristik nebo na

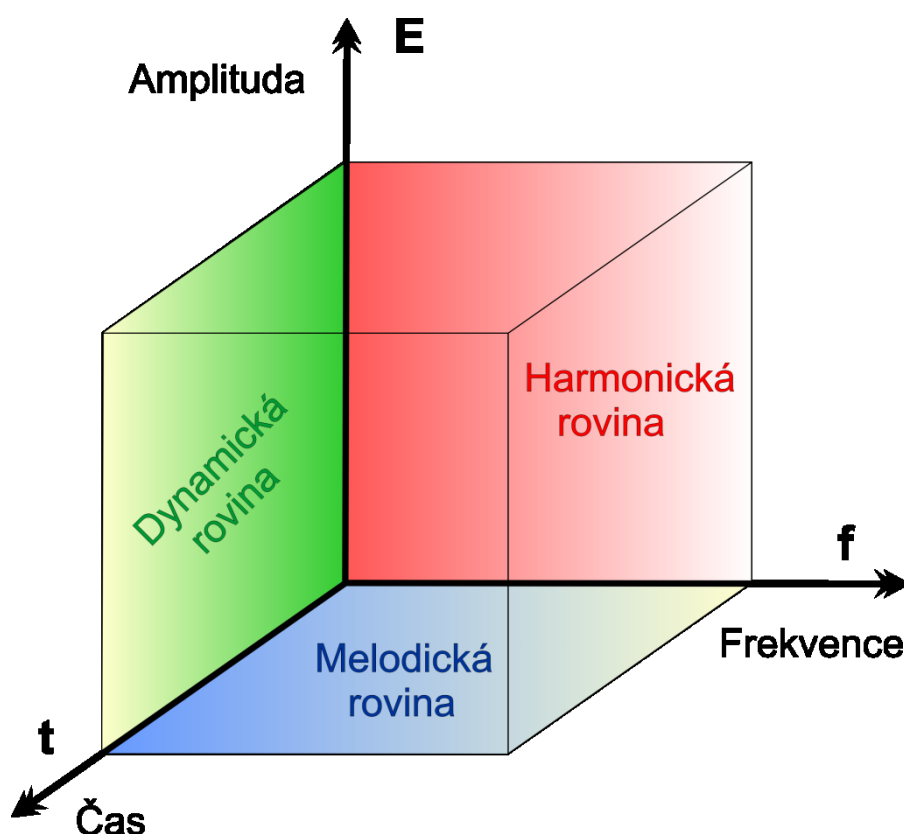
základě modelů vnímání. Druhý příklad se opírá o zkušenosti jedince, který umělé napodobení nástroje vytváří a který přihlíží i na subjektivní vjem cílových posluchačů, které uvedený záměr pochopí a přiřadí slyšenému umělému zvuku správnou předlohu. V této souvislosti uveďme i těsně sousedící skupinu uměle generovaných signálů, které si z akustické předlohy půjčují jen omezenou množinu parametrů zvukového signálu, amplitudovou obálku. Zvuk má pak charakter s ohledem na průběh jeho obálky bez zkoumání spektrálního složení [10]. To je mimo jiné i důvod proč nám při porovnávání a podrobnějším zkoumáním obecných zvukových signálů nestačí použít statický Fourierovský rozklad na jednotlivé harmonické složky ale využívá se jeho dynamické pojetí.

**V inovativním přístupu** [1] se využívá metod syntézy a zpracování signálu pro vytváření nových, dosud neznámých zvuků. Ovšem i na základě opakovaného užívání akustického signálu zprvu nepodobných signálů může vést k utváření modelů vnímání tvůrců i posluchačů. Takovým zvukům pak můžeme přiřazovat určité slovní atributy, vyplývající buď z bezprostředního vnímání barvy zvuku (subjektivní představa kvality zvuku) [5] nebo z porovnávání s uloženými modely z dřívějšího poslechu.

Pro pochopení různých metod syntézy hudebního signálu je užitečné zabývat se analýzou zvukového signálu, což je soubor operací, při kterých rozpoznáváme vlastnosti signálu. Hudební signál je podroben analýze, jehož výsledkem je soubor parametrů, který jej co nejpřesněji popisuje. Syntéza je proces zpětné rekonstrukce hudebního signálu pomocí operací, které vycházejí z výsledků analýzy. To je jeden z výkladů pojmu syntézy, ve kterém vystupuje syntéza jako ověřovací proces pro potvrzení pravdivosti analýzy.

S ohledem na elektronické generování hudebního signálu je možno aparát zvukové syntézy pojmut jako metodu, algoritmus umělého generování signálu. Přesto není analytický přístup k hudebnímu signálu zbytečný, tvoří důležitou součást při snaze dokázat platnost parametrů hudebního signálu na základě subjektivních vjemů lidského sluchu. Slouží jako odrazový můstek mnohých metod umělého generování signálu i jako kontrolní algoritmus pro měření a morfologii.

Pro úspěšné a co nejpřesnější zkoumání charakteristik uměle generovaného signálu nám dobře poslouží **trojrozměrný prostor dynamického pojetí hudebního signálu** [1]. Prostor je vymezen třemi osami, a to času, dynamiky signálu (amplitudy) a frekvence. Viz Obr. 2.1. U statického přístupu pojetí hudebního signálu je prostor pouze dvourozměrný, ohraničený harmonickou rovinou (osami času a frekvence).



Obrázek. 2.1: Trojrozměrný prostor dynamického pojetí hudebního signálu

Jelikož se vlastnosti zvukového signálu v čase mění, je čas nezávislou proměnou jeho parametrů. Závislými proměnnými jsou pak dynamika a frekvence. Průmět trojrozměrného zobrazení zvukového signálu do dynamické roviny určuje časový průběh, resp. časové změny amplitudy. Změnami amplitudy ve větším měřítku časového průběhu lze proložit časovou amplitudovou obálku signálu[11]. Zvukový signál  $s(t)$  s časově proměnnou velikostí lze v dynamickém pojetí pomocí amplitudové obálky popsat takto:

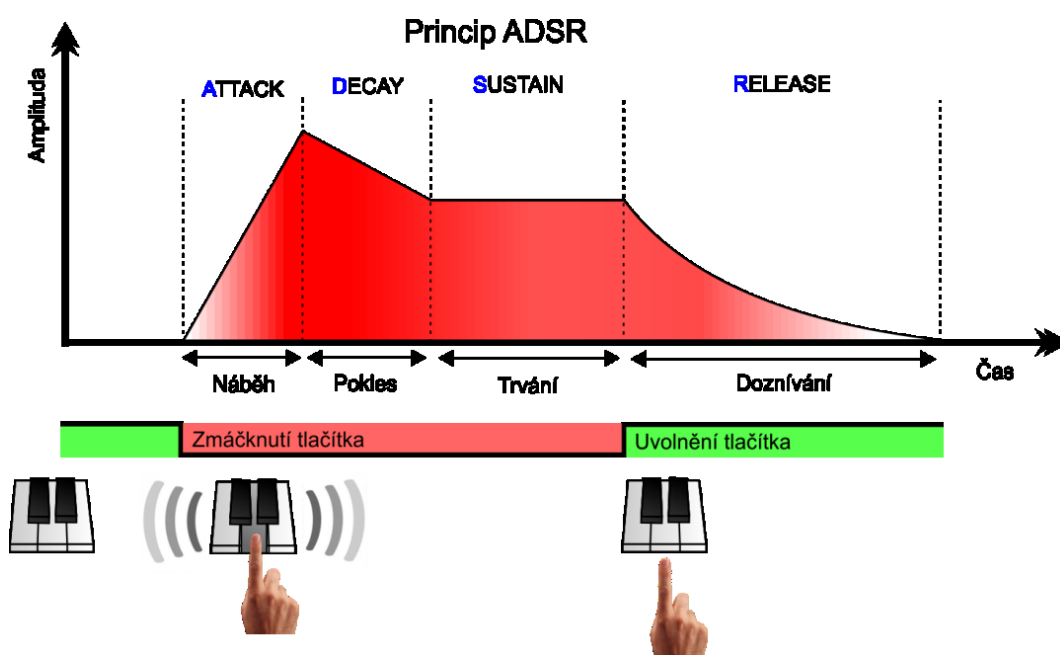
$$s(t) = A(t)s_0(t) \quad (3.1)$$

kde  $A(t)$  je amplitudová obálka signálu a  $s_0(t)$  je nemodulovaný signál s konstantní amplitudou. Toto vyjádření amplitudové obálky signálu přímo odpovídá funkci generátoru obálky (EG) v rozdílové syntéze při aplikaci na obvodu s napětově řízeným filtrem (VCA).

Signály v závislosti na tvaru amplitudové obálky můžeme dělit na **neperkusní** a **perkusní**. Neperkusní signály vykazují tyto tři fáze svého časového průběhu: nakmitávací pochody, zakmitaný stav a dokmitaný stav. Nejčastěji se neperkusní signály spojují se subjektivním vjemem určité výšky znějícího tónu, kdežto u signálů perkusních bývá konkrétní výšku tónu problematické určit.

Jako řídicí obvod v různých druzích syntézy zvuku slouží generátor obálky. Nejjednodušší příklad průběhu řídicího parametru v čase pro řízení například výšky tonu, hlasitosti a dalších zobrazuje obr. 2.2.

Jednotlivé fáze obálky se nastavují pomocí času náběhu ATTACK, překmitu DECAY a dokmitu RELEASE. Úroveň výstupního signálu generátoru obálky po odeznění překmitové fáze se ustálí na hodnotě dané parametrem SUSTAIN.



Obrázek 2.2: Průběh generátoru obálky ADSR

Z hlediska frekvenčních vlastností hudebního signálu nás nejvíce zajímá **frekvenční spektrum**, tj. zobrazení zastoupení frekvencí. Každý obecný signál je totiž složen z většího množství frekvenčních složek, které vnímáme jako jeden celek. Signály **periodické** (neustále se opakující s určitou periodou) vykazují určitou stálou frekvenci a mohou být harmonické tj. obsahující jedinou frekvenční složku harmonického (například sinusového) průběhu, nebo komplexní signál obsahující více harmonických složek.

## 3 Metody zvukové syntézy

Metody zvukové syntézy lze rozlišovat podle různých kritérií, například podle technické realizace na analogové (pracující se signály spojitého průběhu), digitální (se signály diskretizovanými), hybridní (např. s analogovou tvorbou zvuku ale i digitálním ovládáním), hardwarové (realizované speciálními elektronickými obvody, navržené pro konkrétní způsob využití) nebo softwarové (využívající signálové procesy nebo procesory pro všeobecné využití, kde konečnou formu syntézy určuje až algoritmus výpočtu počítačového programu). Obecně můžeme dělit syntézu zvuku také na statickou či dynamickou podle vývoje časových závislostí parametrů zvuku. Dále lze rozlišovat podle lineárního nebo nelineárního pojetí atd.

Ve své práci použiji vžité dělení metod zvukové syntézy, které si více všímá použitého algoritmu a operací při generování a zpracování signálů a je tedy nezávislé na technické realizaci a to dělení na metodu součtovou, rozdílovou, modulační, tvarovou a modelující.

### 3.1 Součtová (aditivní syntéza)

Součtová syntéza [2], nebo také aditivní syntéza, patří mezi nejstarší způsoby generování zvukového signálu. Je založena na sčítání jednoduchých signálů, v nejjednodušším případě signálu se sinusovým průběhem. To popisuje vzorec:

$$f(t) = \sum_{k=1}^N A_k \sin(\omega_k t + \varphi_k) \quad (3.2)$$

Kde  $A_k$  vyjadřuje amplitudu,  $\omega_k$  frekvenci a  $\varphi_k$  fázi  $k$ -té složky při počtu složek  $N$ .

Aditivní syntezátor je tvořen řadou sinusových oscilátorů a řízených zesilovačů. Při velkém počtu složek je zvuková variabilita této syntézy velká. Jednoduchým nastavením intenzitních poměrů harmonických složek lze vytvořit statické, ale velmi bohaté spektrum zvuku. Digitální technika umožnila zkonstruovat stabilní sinusové generátory, které navíc obsahují samostatné generátory obálek pro řízení amplitud harmonických dynamicky, v průběhu času. Této syntéze se říká dynamická součtová syntéza.

Součtová syntéza je charakteristická svou zvukovou strohostí a statičností. Těmito vlastnostmi jsou typické především rejstříky varhanního typu. Pokud není možno modulovat amplitudy jednotlivých harmonických složek stává se zvuk chladným. Také proto se často setkáváme se součtovou syntézou jako doplňkem jiné, zejména lineárně tvarové nebo rozdílové, kde se ve velké míře uplatní filtrace součtového spektra.



### 3.2 Rozdílová (subtraktivní syntéza)

Podstatou rozdílové metody syntézy zvuku [2] je filtrace komplexního signálu se spektrem bohatým na harmonické složky, nejčastěji pilového či obdélníkového průběhu. Jak již název napovídá je opakem metody aditivní. Zatímco aditivní metoda tvoří komplexní vlnovou křivku jednoho signálu, subtraktivní metoda začíná s komplexní křivkou a poté tlumí frekvence pomocí filtrování této křivky. Tato metoda tedy potřebuje pouze několik generátorů signálů a filtrů, aby vyprodukovala zvuky podobné těm, které se dají vygenerovat aditivní metodou. Právě z tohoto důvodu byla subtraktivní metoda tou preferovanou v počátcích návrhů syntezátorů. Softwarový systém syntézy může jednoduše vyprodukovat komplexní vlnovou křivku a filtry, které se poté dají použít v subtraktivní metodě. Protože je ale těžké reprodukovat přírodní zvuk pouze filtrováním, je tato metoda používána spíše pro generování unikátních elektrických zvuků. Největšího rozvoje dosáhla zejména v 60. a 70. letech dvacátého století v analogových syntezátorech. Metoda bývá proto také často označována jako analogová. Jako zástupce analogových syntetizérů lze uvést např. slavné nástroje Roberta Mooga. [13]

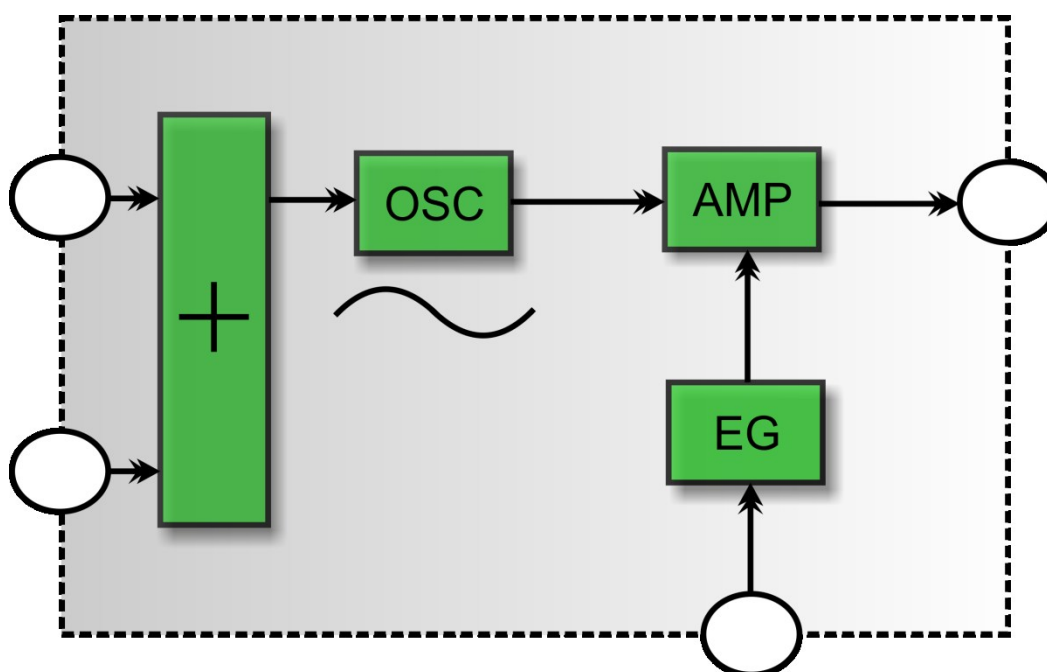
### 3.3 Modulační

Modulační syntéza [2] je nejrozšířenější a nejznámější metodou založené na principu modulace, tedy řízené změně některého z parametrů signálu signálem modulačním, je metoda frekvenční modulace. Kromě ní existuje ještě např. princip amplitudové modulace (*AM*), ale ten se příliš komerčně neuplatnil. Kruhová modulace je naproti tomu častým doplňkem např. rozdílové syntézy. Kde FM syntéza se rovná součtu nosné vlny a modulátoru.

Frekvence modulátoru i nosiče leží ve slyšitelném pásmu a jejich poměrem lze získat buď periodická spektra (celistvý poměr kmitočtů) nebo neperiodická, kovově znějící spektra (iracionální poměr). V některých algoritmech je uzavřena smyčka zpětné vazby, kdy nosič je sám sobě modulátorem, čímž vznikají zajímavé zvukové barvy [5].

Princip frekvenční modulace, jako speciální typ nelineárního směšování existuje už od počátku vývoje radiového přenosu signálu. Její uplatnění v oblasti hudební elektroniky bylo po dlouhou dobu pouze teoretické a uplatnění našla jenom v laboratorních podmínkách až díky počítačovým programům se metoda stává dostupnou pro širší veřejnost. Největšího úspěchu dosáhly FM syntetizéry Yamaha, postavené na bázi specializovaných obvodů s vysokou integrací (LSI) [14]. Na rozdíl od ostatních modulačních metod dosáhla právě FM syntéza největšího komerčního uplatnění. FM nástroje využívají jednoduché sinusové oscilátory spojené do schématu- algoritmu.

Základní řada Yamaha DX a TX syntezátorů i její nejslavnější představitel DX-7 využívá 32 algoritmů, v každém z nich je obsaženo 6 tzv. operátorů. Ty se skládají ze sinusového oscilátoru (OSC) a řízeného zesilovače (AMP) s vlastním generátorem obálky (EG), viz obr 3.1.



Obrázek 3.1: Struktura operátoru FM syntézy firmy Yamaha

Operátory se využívají ve dvou různých rolích: buď jako tzv. nosič (carrier – generátor nosné vlny) nebo jako modulátor. Jednoduchým spojením modulátoru a nosiče vzniká základní stavební kámen FM syntézy. Zvukové možnosti této jednoduché struktury, řízené v podstatě třemi základními parametry (kmitočet modulátoru, kmitočet nosiče a modulační index) jsou obrovské

### 3.4 Tvarová

Princip tvarových metod [2] přináší zcela jiný pohled na oblast umělého generování zvukového signálu [1]. Viděli jsme, že všechny tři předchozí metody syntézy pracují ve frekvenční oblasti (součet, rozdíl a vznik nových spektrálních složek). Tvarové metody jsou založeny na generování a modifikaci časového průběhu, tedy tvaru generované vlny. Metod tvarové syntézy je více. Patří sem např. nelineární tvarování (zkreslení sinusového průběhu nelineárním obvodem), aproximační, segmentační (nahrazení např. sinusového průběhu jednoduššími parabolickými oblouky) nebo granulační (pro generování zvuku používá sled krátkých zvukových úseků (okolo 50ms) tzv.

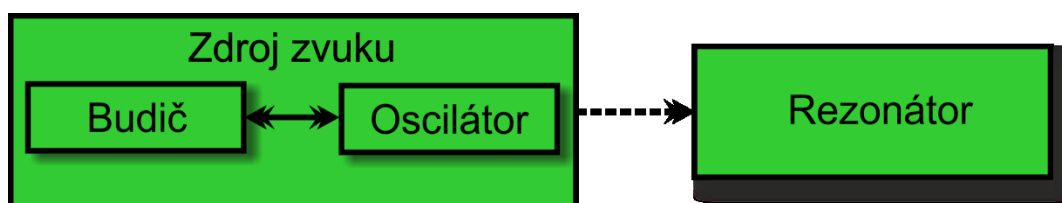
granulek, které se přehrávají velmi rychle za sebou, takže lidský mozek je vnímá jako spojitý zvuk). Výhoda tvarových principů spočívá v tom, že vždy lze několik parametrů změnit a výstavby tvarového průběhu modulovat a docílit tak tak podobných výsledků jako třeba u FM syntézy. Většina těchto metod však nenašla širšího komerčního uplatnění, výjimku tvoří jen lineárně-tvarová syntéza neboli sampling. Princip samplingu spočívá v sejmutí záznamu a jeho zpětným přehráváním libovolného audiosignálu vstupujícího do sampleru, jak se říká zařízení pro vzorkování zvuku.

### 3.5 Modelující metody zvukové syntézy

Sem patří **Virtuální akustická syntéza** (dále jako VA syntéza), která je založena na matematickém modelu složité mechanicko-akustické soustavy [3], jakou každý akustický nástroj nebo lidské hlasové ústrojí bezesporu je. Model je tvořen soustavou rovnic, které popisují mechanické a akustické kmity nástroje při hře. Takovýto model, který sám o sobě není ničím jiným, než obrovským množstvím matematických vztahů, začíná pracovat v momentě, kdy obdrží od obsluhy (tou může být buď člověk nebo stroj) důležitá vstupní data. Na základě počátečních podmínek (vstupních dat) začíná pracovat matematický model v podobě řádově miliónů výpočtů. Výsledkem celého výpočetního procesu je tedy komplexní signál, který odpovídá modelovanému akustickému nástroji. Chceme-li aby celý tento proces probíhal v reálném čase je zapotřebí pro výpočty využít rychlé signálové procesory nebo multiprocessorový systém. Nástroje s modelující syntézou se v první řadě odlišují od ostatních tím, že se nesnaží napodobit zvuk reálného hudebního nástroje jako např. u samplerů ale tím že napodobují přímo jejich princip (jejich funkci). Díky možnosti velmi věrně napodobit zvuk nástrojů pro které byl nadefinován matematický model se stala VA syntéza velmi oblíbenou u mnoha uživatelů. Nelze ovšem říci, že nástup VA syntézy měl za následek zánik skutečných nástrojů. Které dokázali simulovat. Přestože s VA syntézou jdou modelovat i hudební nástroje, které v reálném světě jinak neexistují nebo jinak řečeno ani existovat nemohou. Například skleněná flétna o velikosti pár milimetrů nebo kytara o velikosti mrakodrapu se strunami stejně silnými jako mostní závěsná lana. Meze VA syntézy jsou dány pouze modelem a soustavou hraničních podmínek, pro které dává matematický proces stabilní výsledky. V těchto mezích je tedy možné modelovat vše na co jen uživatel pomyslí. Dokonce i pro vyvolání autentičnosti hudebního projevu lze u VA syntézy simulovat i některé negativní projevy a nehody, kterých se mohou hudebníci při hře na hudební nástroj dopustit. Například lze brát v potaz dýchání hudebníka při hře na dechový nástroj, cvakání kláves při hře na klávesový nebo klouzání prstů, nasazení a podobně což dodává hudbě přirozený charakter.

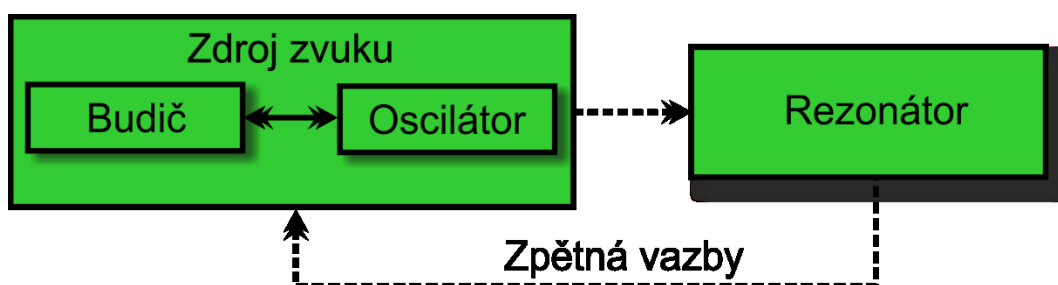
Samotný princip VA syntézy vychází z obecného modelu akustického nástroje [4] (podobně jako syntéza rozdílová), který je tvořen budičem, oscilátorem (tyto dva prvky můžeme pro

zjednodušení nazvat zdrojem zvuku) a rezonátorem. Interakci mezi zdrojem zvuku (rozkmitání hlasivek, drnknutí na strunu nebo zmáčknutí klávesy) a rezonátorem (těla nástroje) je možné rozdělit na dva typy: tlumené a nucené kmity. V prvním případě neexistuje žádná nebo minimální zpětná reakce mezi rezonátorem a zdrojem zvuku a přenos zvukové energie probíhá jednosměrně. Viz schéma na obr. 3.2



Obrázek 3.2: Tlumené kmity

Naproti tomu u nucených kmitů je mezi rezonátorem a zdrojem zvuku uzavřená smyčka zpětné vazby. Takže rezonátor je schopen zpětně ovlivňovat zdroj zvuku. Příkladem nucených kmitů je vznik tónu v saxofonu. Kmitočet vibrujícího plátku je silně ovlivněn akustickou zpětnou vazbou od rezonujícího sloupce vzduchu poté, co mu byl dodán počáteční impuls proudem vzduchu z úst. Viz schéma na obr. 3.3



Obrázek 3.3: Nucené kmity

Metoda matematického modelování zvuku se dočkala své praktické, komerčně dostupné podoby v listopadu **1993** při svém uvedení na hudebním veletrhu v Tokiu. Nástroje pocházejí z produkce **firmy Yamaha** a mají označení **VL-1 a VP-1**. V průběhu dalších let byla vyvinuta další řada nástrojů, nabízející princip *VA* syntézy širšímu okruhu zájemců.

## 4 Softwarový Syntezátor

Patří mezi typ tónového generátoru (obecné označení zařízení, které na základě syntézy nebo samplingu generuje zvuk), který je pouze softwarem v počítači, nemá tedy žádnou fyzickou podobu a proto se nazývá virtuální syntezátor. Veškeré operace těchto syntezátorů se tedy řídí přímo z počítače, a ten následně pak data zpracovává a vysílá na výstup zvukové karty. Softwarovým syntezátorem může být i syntezátor v pravém slova smyslu, může se jednat i o sampler nebo o celou softwarovou pracovní stanici. Všechny se však obecně pro zjednodušení označují softwarový syntezátor. Softwarové syntezátory pracují stejně, jako hardwarové syntezátory. Jsou do nich vysílána MIDI data [17], která syntezátor pomocí určitých procesů, které jsou pro jednotlivé syntezátory různé a pro každý jeden specifické, převede na zvuková data. Tento proces provádí procesor. Proto je důležité mít poměrně výkonný počítač.

Podle těchto specifikací se dá říci, že všechny dnešní digitální syntezátory jsou v podstatě virtuální, softwarové syntezátory. Protože i v hardwarových syntezátorech se získaná MIDI data mění na zvuk v čípech a procesorech. Rozdíl je však v tom, že tyto čipy a procesory jsou navrženy výhradně pro práci se zvukem a jsou k tomu uzpůsobeny. Výsledek tedy může být u hardwarových syntezátorů lepší, není to však pravda vždy. Výhodou softwarových syntezátorů je naopak to, že v jednom počítači můžeme mít zároveň velké množství syntezátorů, které fyzicky nezabírají absolutně žádné místo. Navíc práce s nimi bývá jednodušší. Mezi tři v poslední době nejprodávanější a nejlépe zpracované softwarové syntetizátory patří: Zebra 2, Sylenth 1 a Sytrus.

### 4.1 Nejpoužívanější softwarové syntetizátory [9]

**Zebra 2** [12] patří mezi modulární syntezátor. Spojuje v sobě mnoho různých typů syntézy s výkonným procesem modulace. Dovoluje vytvořit libovolnou aditivní nebo spline bázi vlnovou křivku podle zadání uživatele, nabízí široký výběr spektrálních efektů, různé variace mezi těmito vlnami a klasické syntetické filtry. Dovoluje využití celého zvukového spektra jako modulátor pro FM oscilátor. Všechny generátorové moduly a všechny efekty jsou stereo.

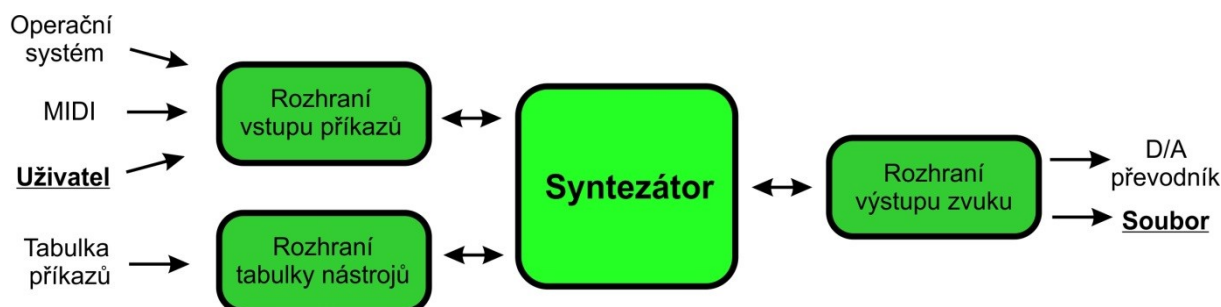
**Sylenth1** [15] je virtuální analogový syntezátor VSTi, který převeze definice kvality a výkonu na vyšší úroveň. Až dosud jen velmi málo softwarových syntezátorů bylo schopno postavit se

na zvukové standardy kvality hardwarových syntezátorů. Sylenth1 byl postaven pro tvorbu vynikající kvalitní zvuku a hudby.

**Sytrus** [16] je virtuální syntetizátor pracující na bázi hybridní syntézy, což je dnes asi nejpoužívanější typ moderních syntetizátorů. Místo klasických analogových oscilátorů pracuje hybridní syntéza na bázi pevné periodické křivky. Tento VSTi nástroj zaujme především svou kvalitou a je určen spíše pro pokročilé uživatele. Program je však nutno použít v některém z digitálních audio studií, například v FL Studiu.

## 4.2 Návrh vlastního syntetizátoru

Obecný model syntetizátoru se skládá z více částí viz. obrázek 4.1 a to zejména z bloku samotného syntezátoru, který provádí příkazy a převádí je na zvuk hraných nástrojů. K němu je připojen vstupní modul, který převádí příkazy a vstupní data do formátu vhodného ke zpracování syntezátorem. Dále je tu modul banky nástrojů, který udržuje v paměti popis právě používaných nástrojů a navíc je schopen převést banky nástrojů z cizích formátů. Nakonec je tu výstupní modul, který převádí zvuková data ze syntetizátoru na potřebný výstupní tvar (například při ukládání do souboru převede výstup na wav formát).



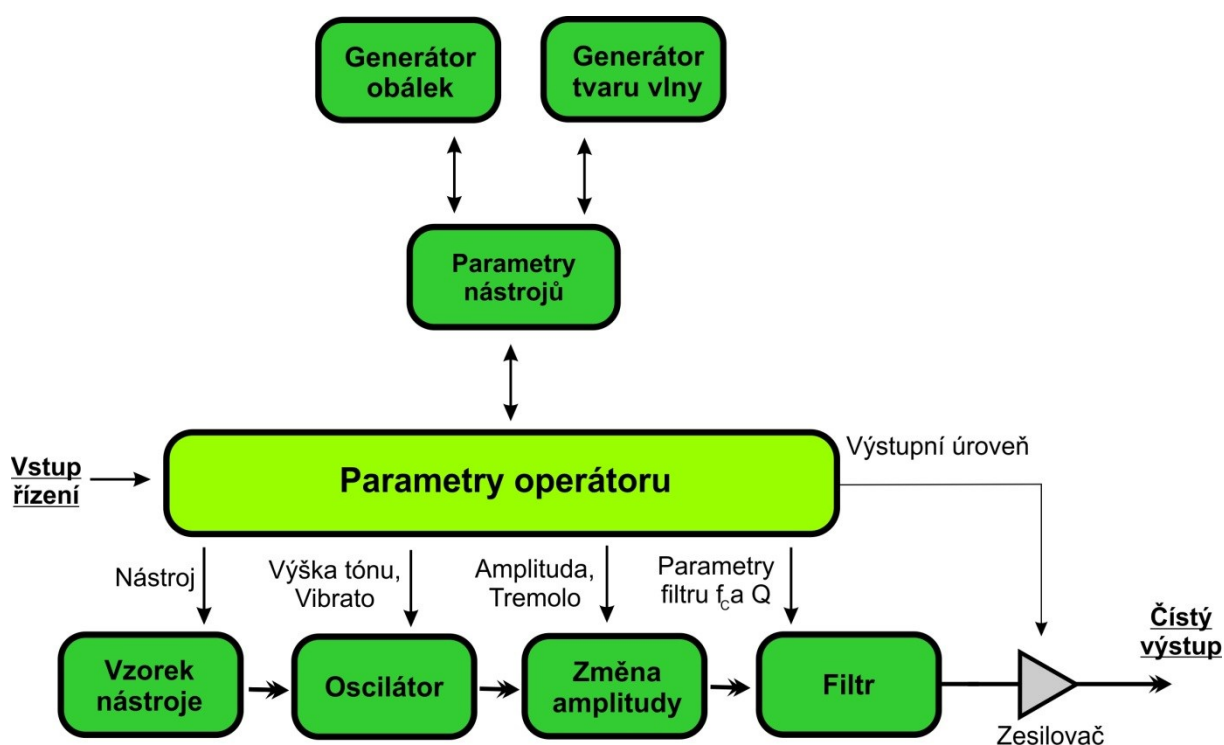
Obrázek. 4.1: Celkové blokové schéma syntetizátoru a okolí

Za programovací jazyk, ve kterém je syntetizátor vytvořen jsem zvolil dynamicky objektově orientovaný skriptovací programovací jazyk Python. Ten je vyvíjen jako open source projekt a jeho instalační balíky jsou dostupné pro většinu běžných platforem (např. Unix, Windows, Mac OS). Jedná se o hybridní jazyk což znamená, že umožňuje při psaní programu využívat jak objektově orientovaná paradigma tak procedurální a v omezené míře i funkcionální podle toho co daná situace zrovna vyžaduje. Kód programu je ve srovnání s ostatními jazyky krátký a dobře čitelný. Python se snadno a často vkládá do jiných aplikací, kde pak slouží jako jejich skriptovací jazyk a tím pak aplikacím psaným v kompilovaných jazycích dodává chybějící pružnost. Nebo jako v mém případě využívá jiné aplikace nebo aplikační knihovny. Já využívám multiplatformní programovou knihovnu PyAudio, která vychází z knihovny PortAudio a je speciálně upravená pro použití v jazyce Python. PyAudio se využívá pro přehrávání a záznamu zvuku a může být snadno použita na více platformách (např. Linux, Windows, Mac OS).

### 4.3 Řešení syntetizátoru

Jedná se o softwarové řešení syntetizátoru, který využívá signálové procesy, kde konečnou formu syntézy určuje až algoritmus výpočtu počítačového programu. Pro výpočet syntézy používám součtovou syntézu, které patří mezi nejstarší a nejpoužívanější způsoby generování zvukového signálu. Konkrétně se jedná o sčítání signálu se sinusovým průběhem. Programové řešení je rozděleno do konkrétních bloků operátoru. V operátorech jsou soustředěny všechny elementy generující zvuk. Každý operátor se skládá z několika po sobě jdoucích funkčních bloků viz. obr. 4.2. a to z:

- lokálních parametrů operátoru, generátor obálek a LFO
- oscilátor: změna frekvence vzorku a frekvenční modulace (vibrato)
- hlasitost, amplitudová modulace (tremolo)
- filtr (nepovinný)
- výstupy (oddělené výstupy do výstupního mixéru a efektového procesoru)

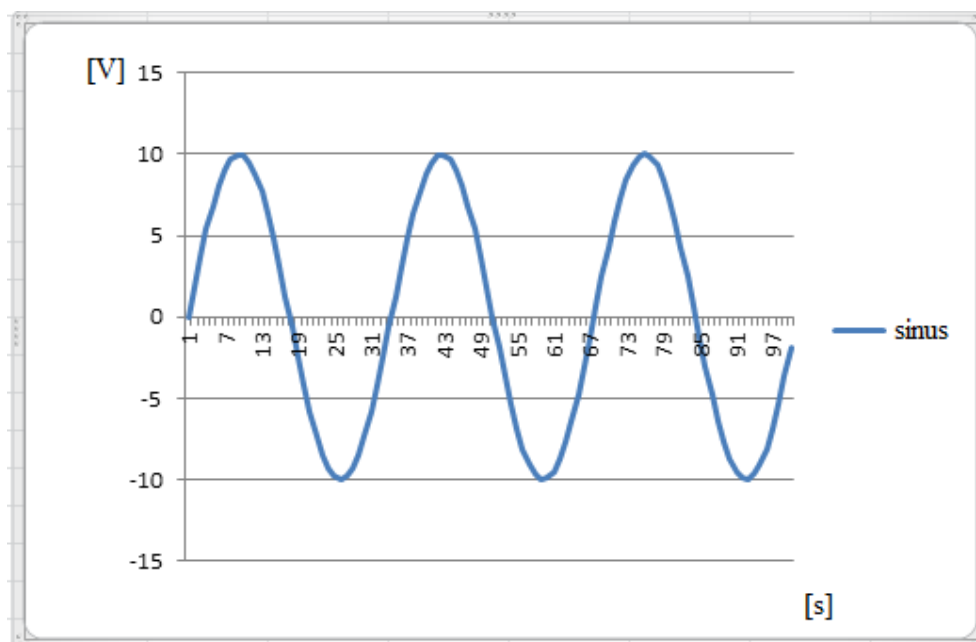


Obrázek 4.2: Bloková struktura operátoru

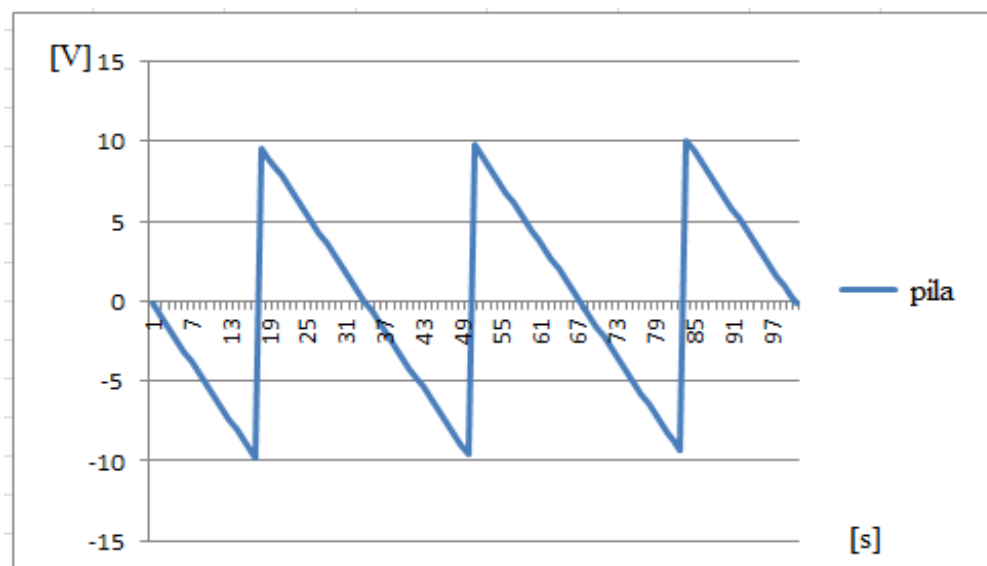


## Generátor obálek

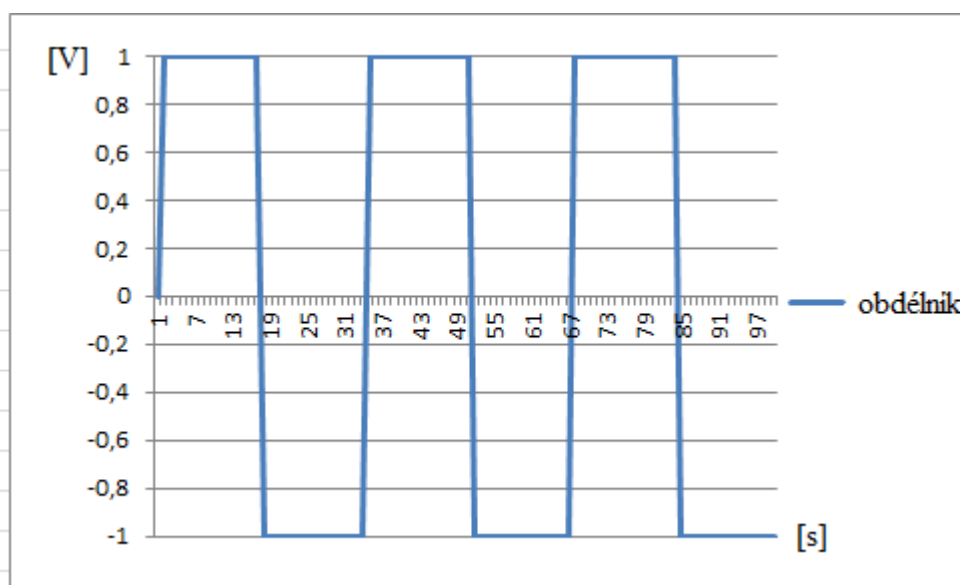
EG (Envelope Generator) je zodpovědný za vytváření náběhu a poklesů hlasitosti nástroje v čase. Někdy bývá použit také pro řízení jiných stavových veličin např.: výška tónu, hloubky efektů, naladění filtru a jiné. Abychom mohli určitý signál modulovat touto obálkou, musíme na výstup generátoru zařadit řízený zesilovač. Na jeho vstup bude přiveden libovolný signál (sinus, trojúhelník, pila...) a na řídicí vstup vygenerovaný ADSR průběh. V mém případě se jedná o sinusový signál viz. obr. 4.3 (mohou se vyskytnout i signály pilovité obr. 4.4 a obdélníkovité obr. 4.5) a vygenerovaný průběh ADSR viz obr. 4.4.



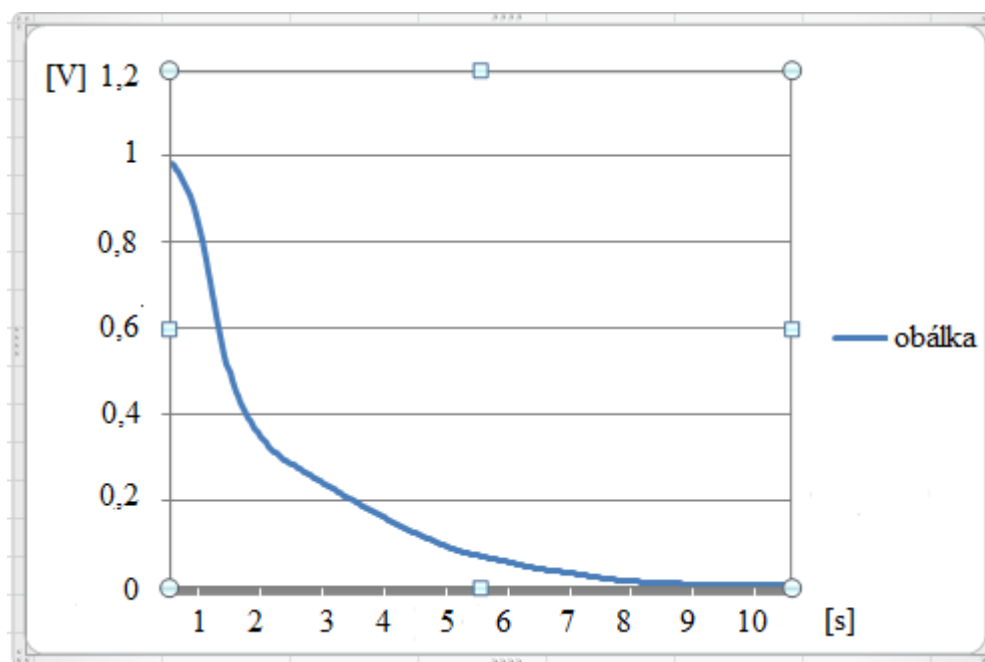
Obrázek 4.3: Vstup: sinusový signál



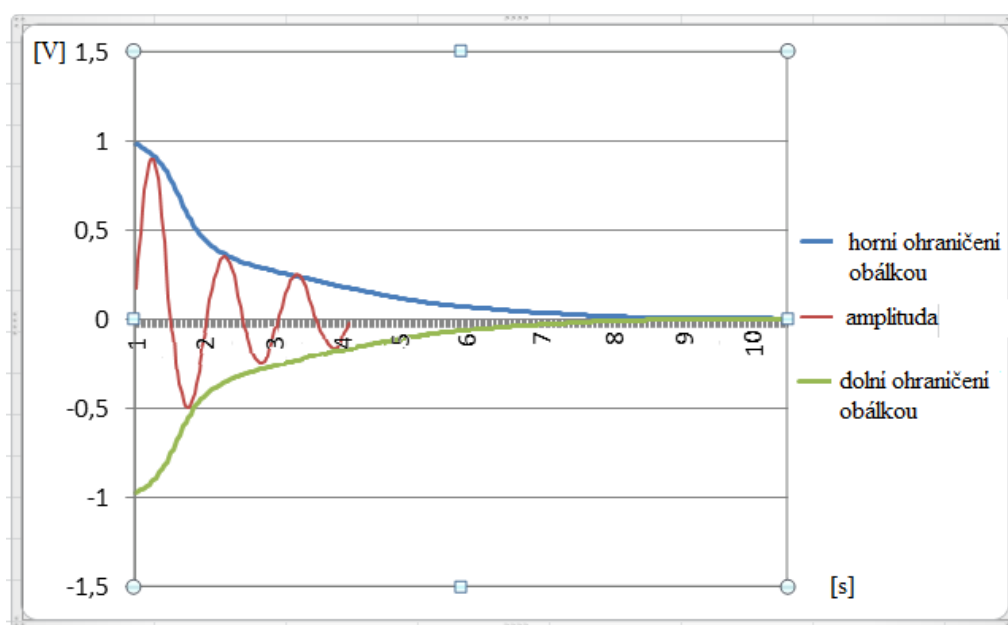
Obrázek 4.4: Vstup: pilovitý signál



Obrázek 4.5: Vstup: obdélníkový signál



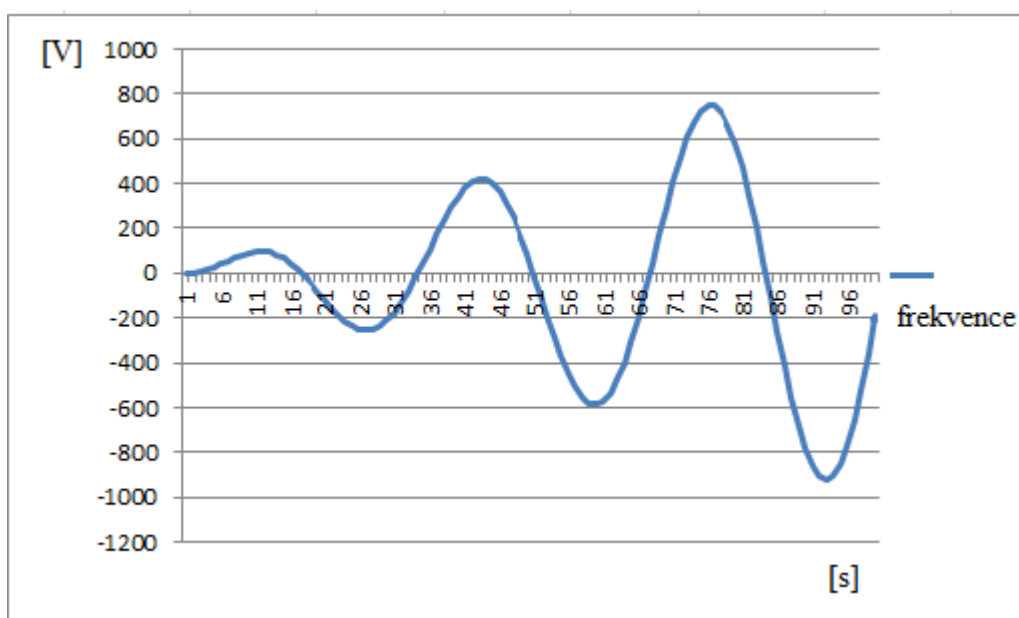
Obrázek 4.6: Vstup: vygenerovaná obálka



Obr 4.7: Výstup z generátoru obálky

## Oscilátor

Je základní blok, který slouží jako generátor signálu pro zpracování dalšími částmi syntezátoru. Na rozdíl od analogových oscilátorů, které vytváří harmonické signály elektronicky, je tento oscilátor založen na cyklickém přehrávání vzorku zvuku uloženého v paměti počítače. Současně provádí konverzi vzorku z původní na přehrávanou frekvenci. Oscilátor je řízen několika parametry zejména: vzorkem zvuku (úsek paměti obsahující zvuk nástroje), výškou tónu (rychlost a hloubka frekvenčního vibráta) a začátkem a koncem smyčky (přehrávajících se cyklicky).

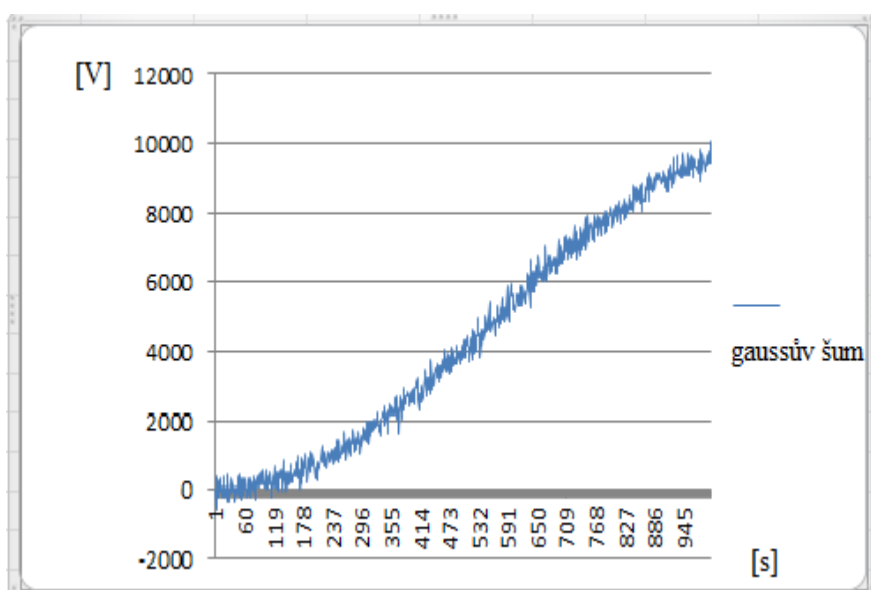


Obrázek 4.8: Vstup: vygenerovaný řídicí parametr oscilátoru

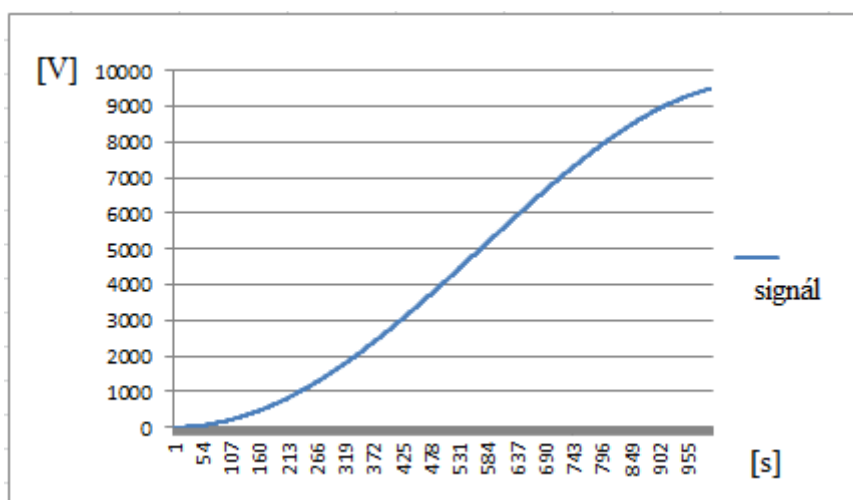
## Filtr

Hlavní použití filtrů při syntéze zvuku je potlačení nežádoucích složek spektra (šumu).

Pokročilejší systémy používají přeladitelné filtry jako další stupeň modulace zvuku. Možnost použití filtrů na úpravu zvukových signálů jsou téměř neomezené, bohužel návrh a takovýchto filtrů je velmi složitý proces, který se ve všech případech nedá algoritmizovat a také proto v mém programu není tento druh filtrů použit. Obecně se však při zvukové syntéze nejčastěji využívá filtrů typu dolní propust. Ostatní druhy filtrů (horní propust, pásmová propust a zadrž) se používají jen ve speciálních případech. Ukázka použití filtru Gaussova filtru obr. 4.9 a 4.10.



Obrázek 4.9: Vstup: signál s nežádoucími složkami spektra

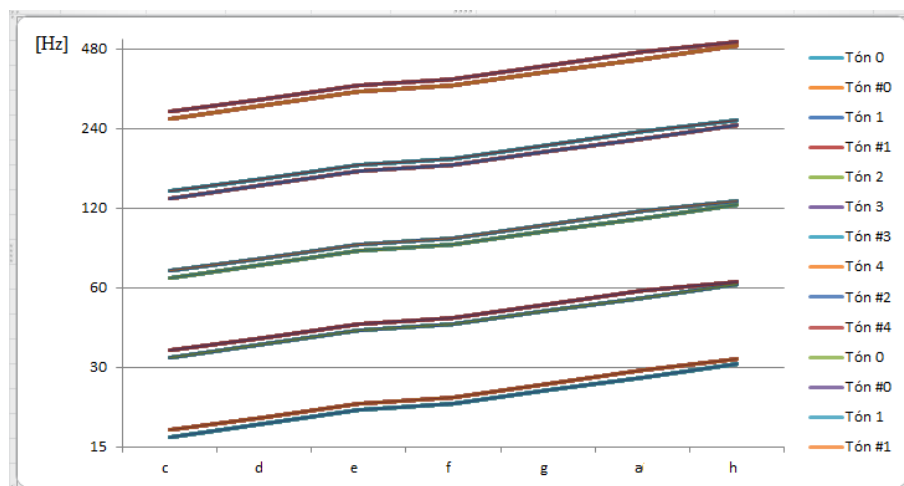


Obrázek 4.10: Výstup: Po použití Gaussova filtru

## Vzorek Nástroje

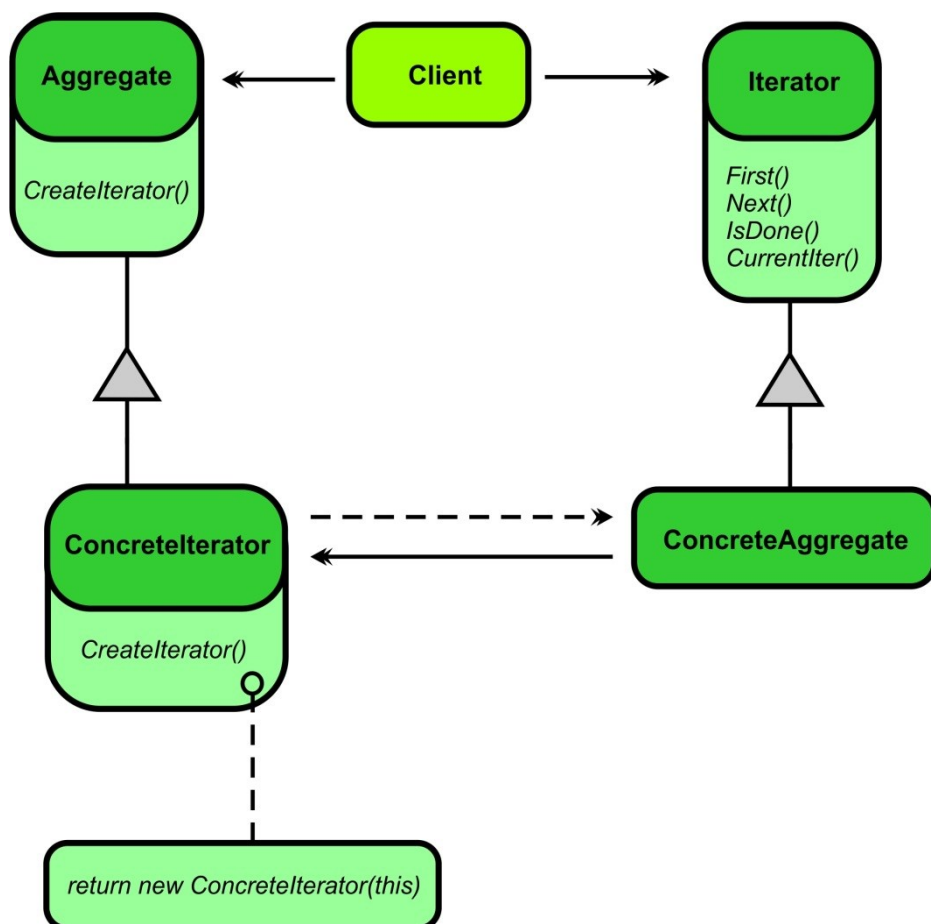
tón	frekvence	tón	frekvence	tón	frekvence	tón	frekvence
c0	16,35	c#0	17,32	g2	98	g#2	103,83
d0	18,35	d#0	19,45	a2	110	a#2	116,54
e0	20,6	e#0	21,8	h2	123,47	h#2	127,67
f0	21,83	f#0	23,12	c3	130,81	c#3	138,59
g0	24,5	g#0	25,96	d3	146,83	d#3	155,56
a0	27,5	a#0	29,14	e3	164,81	e#3	174,37
h0	30,87	h#0	32,3	f3	174,61	f#3	185
c1	32,7	c#1	34,65	g3	196	g#3	207,65
d1	36,71	d#1	38,89	a3	220	a#3	233,08
e1	41,2	e#1	43,6	h3	246,94	h#3	258,35
f1	43,65	f#1	46,25	c4	261,63	c#4	277,18
g1	49	g#1	51,91	d4	293,66	d#4	311,13
a1	55	a#1	58,27	e4	329,63	e#4	348,75
h1	61,74	h#1	63,25	f4	349,23	f#4	369,99
c2	65,41	c#2	69,3	g4	392	g#4	415,3
d2	73,42	d#2	77,78	a4	440	a#4	466,16
e2	82,41	e#2	87,19	h4	493,88	h#4	513,11
f2	87,31	f#2	92,5				

Obrázek 4.11: tabulka frekvencí tónů



Obrázek 4.12: graf frekvencí tónů

Při samotném řešení syntetizátoru jsem využil návrhový vzor Iterátor, který slouží k vytvoření rozhraní, které umožňuje sekvenčně procházet objekty v libovolné struktuře. Iterátor patří mezi tzv. GoF (Gang of Four) vzory [7]. Na rozdíl od ostatních jazyků, které pouze implementují rozhraní pro využití iterátoru u Pythonu je součástí samotného jazyka.



Obrázek 4.13: Třídní diagram: návrhový vzor Iterátor

Poskytuje způsob, jak přistupovat k prvkům celkového objektu postupně, aniž by odhalil jeho základní reprezentaci. Abstrakce poskytuje vzoru Iterátor možnost upravovat kolekce realizací bez jakýchkoli změn mimo kolekci. To umožňuje vytvořit obecně použitelný GUI komponent, který může iterovat nějakou sbírku žádostí. Ukázka využití návrhového vzoru v programu pro generování sinusového (viz obr. 4.14) a obdélníkového (viz obr. 4.15) průběhu.

```
def sineWaveGenerator(deltatime, frequency, amplitude):  
    print "NewGenerator: dt: {0}, f: {1} Hz, A: {2}".format(deltatime, frequency,  
amplitude)  
    time = 0.0  
    a = float(amplitude)  
    dt = float(deltatime)  
    f = float(frequency)  
    while True:  
        yield a*math.sin(time*2.0*3.14159*f)  
        time += dt
```

Obrázek 4.14: Ukázka kódu: generátor sinusové vlny

```
def squareWaveGenerator(deltatime, frequency, amplitude):  
    print "NewGenerator: dt: {0}, f: {1} Hz, A: {2}".format(deltatime, frequency,  
amplitude)  
    time = 0.0  
    a = float(amplitude)  
    dt = float(deltatime)  
    f = float(frequency)  
    while True:  
        val = a*math.sin(time*2.0*3.14159*f)  
        if val > 0: yield a  
        else: yield -a  
        time += dt
```

Obrázek 4.15: Ukázka kódu: generátor obdélníkové vlny



## **5 Popis testu a experimentu**

Na otestování funkčnosti syntetizátoru jsem nechal program vygenerovat různé druhy tónů s rozdílnými tvary signálu obálky (sinusový, pilovitý a obdélníkový) a vytvořil ukázkovou hudbu z počítačové hry Mario. Vše součástí přiloženého cd.

## 6 Závěr

Díky této práci jsem se seznámil s technologiemi, které se v současné době používají při softwarové tvorbě zpracování zvuku. V první řadě s různými metodami zvukové syntézy pak také jak generovat zvukový signál a které softwarové syntezátory jsou v dnešní době nejprodávanější a nejpoužívanější.

Dokázal jsem vytvořit vlastní virtuální syntezátor pro otestování nastudované teorie, kterou jsem až při jeho implementaci skutečně začal rozumět. Více jsem pochopil co je to vlastně zvuk, který každý den kolem sebe slyším, jak se dá simulovat a jaké algoritmy se při jeho generování používají.

Prohloubil jsem si znalost programovacího jazyka Python ve kterém jsem softwarový syntetizátor programoval a seznámil jsem se s knihovnou Pyaudio, která je rozšířením knihovny PortAudio používané pro jazyk C++. Výhody užití jazyka python tkví v jednoduchosti jeho implementace a jeho využití pro více platforem což bylo mimo jiné i jedním bodem zadání bakalářské práce. Nevýhodou je rychlost jeho interpretace na rozdíl od jazyka C++ je Python pomalejší což jej znevýhodňuje z hlediska generování zvuku v reálném čase.

---

## Použitá literatura

- [1] GRACE, Richard. *Hudba a zvuk na počítači: elektroakustické hudební nástroje*. Kapitola 2, Teorie zvukové syntézy 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 1999, 288 s. ISBN 80-716-9519-X.
- [2] GRACE, Richard. *Hudba a zvuk na počítači: elektroakustické hudební nástroje*. Kapitola 3, Typologie metod zvukové syntézy 1. vyd. Praha: Grada Publishing, 1999, 288 s. ISBN 80-716-9519-X. .
- [3] Urban, Ondřej. *Instrumentář elektroakustického zvuku*. 1. vyd. Praha: Akademi múzických umění, 2007, 93s. ISBN 978-80-7331-115-5
- [4] FORRÓ, Daniel. *Musitronika: elektroakustické hudební nástroje*. Vyd. 1. Brno: Janáčkova akademie múzických umění, 2001, 88 s. ISBN 80-854-2950-0.
- [5] SYROVÝ, Václav. SYROVÝ VACLAV. *Hudební akustika*. 1. vyd. Praha: Akademie múzických umění, 2003, 427 s. ISBN 80-733-1901-2.
- [6] GUŠTAR, Milan. *Elektrofony: historie, principy, souvislosti*. Vyd. 1. Praha: Uvnitř, 2008, 518 s. ISBN 978-802-3984-477.
- [7] GAMMA, Erich. *Design patterns: elements of reusable object-oriented software*. Massachusetts: Addison-Wesley, c1995, xv, 395 s. ISBN 02-016-3361-2.
- [8] Fourierovy Transformace. physics.fme.vutbr. [online] Dostupné z:  
<http://physics.fme.vutbr.cz/~komrska/Fourier/KapF02.pdf>
- [9] Audiotuts+ Top 6 Software Synths. Audio.tutsplus [online]. [cit. 2011-07-29]. Dostupné z:  
<http://audio.tutsplus.com/articles/buyers-guides/audiotuts-top-5-software-synths/>
- [10] Spectral.composition.moz.ac.at.[online].Dostupné  
[http://www.moz.ac.at/sem/lehre/lib/bib/software/cm/Notes\\_from\\_the\\_Metalevel/spectral.html](http://www.moz.ac.at/sem/lehre/lib/bib/software/cm/Notes_from_the_Metalevel/spectral.html)
- [11] Časové charakteristiky hudebních signálů. zvuk.hamu.cz. [online] Dostupné z:  
<http://zvuk.hamu.cz/vyzkum/dokumenty/Lit66.pdf>
- [12] Zebra.u-he. [online]. Dostupné z: <http://www.u-he.com/cms/zebra>
- [13] Moogmusic. [online]. Dostupné z: <http://www.moogmusic.com>
- [14] Large Scale Integration. research.microsoft.com, Dostupné z:  
<http://research.microsoft.com/enus/um/people/gbell/cgb%20files/large%20scale%20integration%207209%20c.pdf>

---

[15] Sylenth1. lennardigital. [online]. Dostupné z:

<http://www.lennardigital.com/modules/sylenth1/>

[16] Sytrus.kvraudio . [online]. Dostupné z:

[http://www.kvraudio.com/product/sytrus\\_by\\_image\\_line](http://www.kvraudio.com/product/sytrus_by_image_line)

[17] MIDI data. searchcio-midmarket.techtarget [online] Dostupné z:

<http://searchcio-midmarket.techtarget.com/definition/MIDI>

---

## Seznam příloh

Součástí BP/DP je CD/DVD.

Adresářová struktura přiloženého CD/DVD:

src/

Kompletní zdrojový kód.

readme.txt

Instrukce pro spuštění testování aplikace

data/

Data potřebná pro chod programu.

Sample/

Obsahuje ukázkovou hudbu z počítačové hry Mario vytvořené syntetizátorem vlastní výroby. Dále obsahuje stupnici tónů (cdefgah) a ukázky z vývoje programu.